

I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、根村 英克

助教 伊敷 吾郎、大野 浩史、佐藤 勇二、毛利 健司

計算科学研究センター客員研究員 青木 慎也（京都大学基礎物理学研究所）

研究員 浮田 尚哉、木村 哲士、齋藤 華、佐々木 健志、滑川 裕介、村木 久祥、

大学院生 （9名）

【人事異動】

金谷和至教授が数理物質系長を退任し、素粒子論研究室の教授に復帰した（2015年4月1日）。

谷口裕介博士が計算科学研究センター准教授に昇任した（2016年1月1日）。

【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論と超弦理論の2つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子QCDの大型シミュレーション研究を推進している。格子場の理論グループの研究者の大半が参加する主要プロジェクトであるHPCI戦略プログラム分野5研究開発課題1「格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定」は、2015年度で終了した。2016年秋からJCAHPC（最先端共同HPC基盤施設：筑波大学と東京大学両機関の教職員が中心となり設計するスーパーコンピュータシステムを設置し、最先端の大規模高性能計算基盤を構築・運営するための組織）においてOakforest-PACS（ピーク演算性能25PFLOPSの超並列クラスタ計算機、「京」を超える国内最高性能システムとなる見込み）が稼働予定であり、これに向けてPACS Collaborationを組織し、準備研究を開始している。これと並行して、有限温度・有限密度QCDの研究、テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子QCD配位やその他のデータを共有する為のデータグリッドILDG/JLDGの構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、2015年度で終了したHPCI戦略プログラムの後継として、2016年度から「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」に関するアプリケーション開発・研究開発が始まった。現在9つの重点課題が設定されており、9番目の課題である「宇宙の基本法則と進化の解明」が素粒子物理・原子核物理・宇宙物理分野が対象とする基礎科学的研究課題である。その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp> に詳しい。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ・重力対応という 3 つの 関連するテーマを中心として研究を進めている。今年度は博士研究員の木村氏・村木氏が加わったことにより、研究の幅が広がった。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の次元正則化とループ振幅、ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論の研究、コヒーレント状態を用いた行列幾何の研究等、超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

【1】 格子場の理論

(金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、根村 英克、浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介)

(1) HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題

分野 5「物質と宇宙の起源と構造」の戦略目標は、ビッグバンに始まる宇宙の歴史に於ける、素粒子から元素合成、星・銀河形成に至る物質と宇宙の起源と構造を、複数の階層を繋ぐ計算科学的手法で統一的に理解することにある。この目標を目指して 4 つの研究開発課題が設定されており、そのうちの 하나가「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」である。本課題が目指すものは、格子 QCD 計算の微細化とマルチスケール化を鍵とする新しい展開である。微細化とは、アイソスピン対称性の破れの効果を取り入れた計算や、低エネルギーのハドロン構造計算を意味する。他方、マルチスケール化とは、格子 QCD を用いた原子核の直接構成によってその束縛エネルギーを求めたり、あるいは核子間の有効ポテンシャルを調べたりすることを意味する。前者は、山崎・藏増を中心としたグループによって推進されており、後者は HAL QCD Collaboration が取り組んでいるアプローチである（後述）。

「京」で生成された配位を用いた基本物理量計算

「京」では、DDHMC (Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) 法を用いて、 96^4 の格子サイズ、0.1 fm 程度の格子間隔を持つ、2+1 フレーバー ($m_u = m_d \neq m_s$) QCD のゲージ配位を生成した。この配位の最大の特徴は、 $(9\text{fm})^3$ という従来にない圧倒的な大きさの空間体積である。その最大の利点は、複数の核子から原子核を直接構成することが可能になることや、離散化された運動量の刻み幅が細くなることによって、ハドロン形状因子の運動量空間における精密な解析が可能となることである。配位生成は 2014 年度初めに終了し、HA-PACS (計算ノード数 332、GPU 部ピーク演算性能 1.048Pflops、CPU 部ピーク演算性能 0.118Pflops) を用いてハドロン質量などの基本物理量の測定を行ってきた。2015 年度は、ハドロン質量、クォーク質量、擬スカラー中間子崩壊定数などの基本的な物理量の計算に対して時空間並進対称性を利用した統計精度の向上を目指した。図 1 は物理点でのハドロン質量計算の最終結果を実験値と比較したものである。ここでは、クォーク質量 ($m_u = m_d \neq m_s$) と格子間隔を決めるための 3 つの物理量として、 π 中間子質量 (m_π)、 K 中間子質量 (m_K)、 Ω バリオン質量 (m_Ω) を採用している。

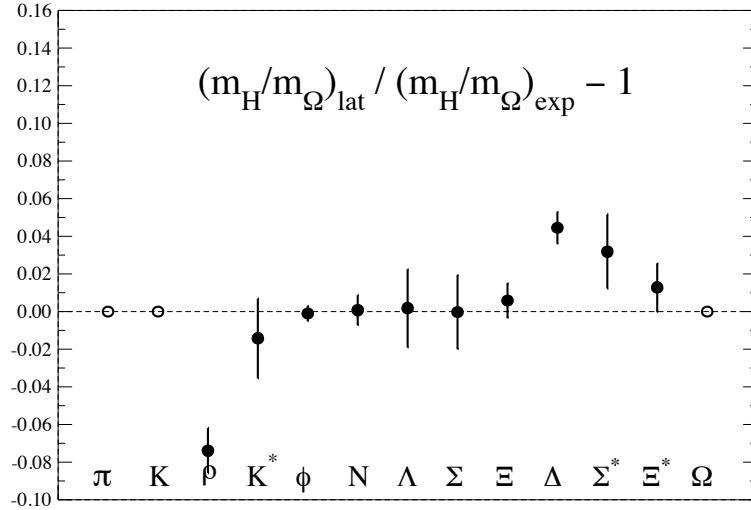


図 1: 2+1 フレーバー格子 QCD 計算で得られたハドロン質量と実験値との比較。白抜きシンボルはクォーク質量と格子間隔を決めるための物理インプットを表す。

安定粒子 (強い相互作用で崩壊しない) は実験値と誤差の範囲で一致しているのに対して、不安定粒子 (強い相互作用で崩壊する ρ や Δ など) は、誤差の範囲を超えて実験値との有意なズレが見て取れる。これは、現在採用しているハドロン質量の計算方法が不安定粒子に対しては有効でないことを表しており、これほど明確に実証された例は世界で初めてである。この他、ハドロン質量の計算と並行して、擬スカラー中間子の崩壊定数、カイラル摂動論における低エネルギー定数、核子のシグマ項などの計算も実行し、大変興味深い結果を得ている (論文 8)。

(2) K 中間子崩壊振幅の研究

素粒子標準模型には、昔からの未解決な問題で、かつ理論の検証において極めて重要な問題が残されている。 K 中間子崩壊での $\Delta I = 1/2$ 則の解明と、 CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) の理論からの予測である。これらの問題には、 K 中間子が二つの π 中間子に崩壊する場合の崩壊振幅の計算が必要である。

石塚、吉江らは、格子 QCD により崩壊振幅を格子 QCD により数値計算し、問題の研究を行った。 π 中間子質量 $m_\pi = 280 \text{ MeV}$ の元で、終状態の π 中間子が運動量をもたない場合の計算を完成させた (文献.9)。この計算により、 $\Delta I = 1/2$ 則の兆候を見ることができた。 CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) に関しては統計誤差が非常に大きく、計算の改善が必要であることが分かった。

この研究を元に、計算を運動量をもつ現実の崩壊の場合に拡張し、信頼性の高い振幅を求める研究を開始した。現在、崩壊振幅の計算のために、新たなゲージ配位を生成し、本格計算に向けた試験計算を行っている。

(3) 有限温度・有限密度 QCD の研究 (WHOT-QCD Collaboration)

金谷、谷口らは、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。

改良 Wilson クォークによる $N_F = 2 + 1$ QCD の物理点近傍における状態方程式のための配位生成を継続して推進するとともに、状態方程式の評価に必要なベータ関数を QCD の多変数空間で精度よく決定する手法として、多重点再重み付け法によるベータ関数評価の試験を行った。さらに、Gradient Flow 法を用いた有限温度状態方程式の評価を、動的クォークを含む QCD で実行する最初の研究を開始し、試験研究の結果を得た。

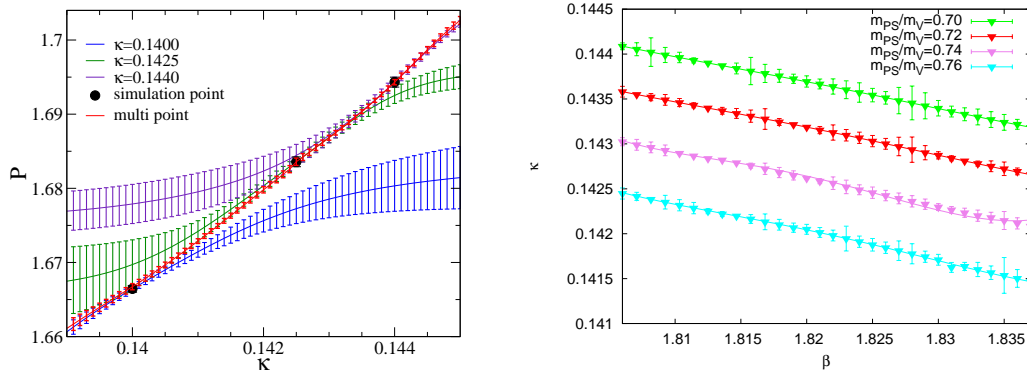


図 2: $N_F = 2$ QCD における多重点再重み付け法の研究 [論文 11]。左図：改良プラケット $P = c_0 W^{1 \times 1} + 2c_1 W^{1 \times 2}$ の期待値の $\beta = 1.825$ における κ 依存性。黒丸は、3つのシミュレーション点における観測結果。紫、緑、青は、3点それぞれのデータによる単純な再重み付け法の結果。「重ねあわせ問題」のために、パラメータを大きく動かすと単純な再重み付け法では観測結果を再現できないことがわかる。赤は、3点のデータを多重点再重み付け法により結合して計算した結果。観測結果をスムーズに繋ぎ、広いパラメータ領域で精度の高い計算が可能となる。右図： m_{PS}/m_V の結果から求めた等物理線 (LCP)。 m_{PS}/m_V が 1 に近いほどクォーク質量が大きい場合に相当する。

多重点再重み付け法による QCD ベータ関数

有限温度・有限密度 QCD の状態方程式や物理量の温度・密度依存性を計算するためには、理論のパラメータ空間内の「等物理線 (Line of Constant Physics: LCP)」(同一の物理系を様々な格子間隔で表現) と、LCP 上でパラメータの格子間隔依存性をあらわす「ベータ関数」の情報が必要である。QCD は、ゲージ結合定数 (β) と複数のクォーク質量 (κ) や化学ポテンシャル (μ) を基本パラメータとして持つが、多次元のパラメータ空間で LCP やベータ関数を精度よく評価することは簡単ではない。それを解決するために「多重点再重み付け法 (multi-point reweighting 法)」を検討し、密度ゼロの $N_F = 2$ QCD の場合に試験研究を行った (論文 10,11)。

系のパラメータ依存性を調べる有力な方法として、再重み付け法 (reweighting 法) がよく使われるが、有限温度・有限密度 QCD の研究で要求されるような、

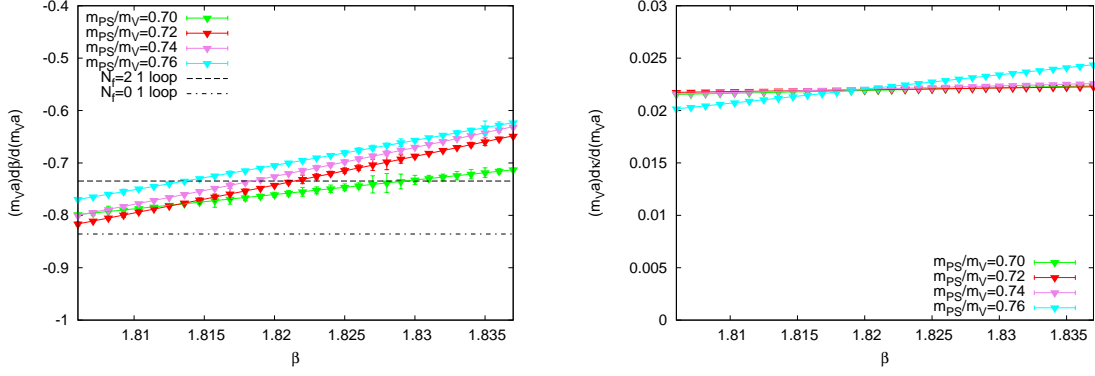


図 3: 多重点再重み付け法による、 $N_F = 2$ QCD のベータ関数 $a(d\beta/da)$ (左図) と $a(d\kappa/da)$ (右図)。 $m_V a$ を近傍で結合パラメータの 2 次フィットした結果に基いて計算したもの。左図の破線は、 $N_F = 0$ と 2 の場合の摂動 1 次の結果。[論文 11]

パラメータ空間の広い領域に応用することには困難が伴う。図 2 左に、改良ブラケット P の κ 依存性を示す。黒丸は 3 つのシミュレーション点における観測結果で、紫、緑、青は、それぞれのシミュレーション点のデータを使って再重み付け法を使って計算した P の κ 依存性の予言をあらわす。パラメータを大きく動かすと観測結果を再現できないことがわかる。誤差評価も信頼性が低く、このまま LCP やベータ関数の計算に使うことは難しい。これは、再重み付け法に必要なヒストグラムを、各シミュレーション点での期待値近傍でしか信頼できる評価ができず、期待値が大きく動く事に対応するようなパラメータの大きな変化に対応できない事による（「重ねあわせ問題」）。

多重点再重み付け法では、重ねあわせ問題を解決するために、複数のシミュレーションデータを統合して再重み付けする。図 2 左図に、3 つのシミュレーションを合わせて多重点再重み付け法により計算した結果を赤線で示す。観測結果（黒丸）をスムーズに繋ぎ、シミュレーション点の間の領域も含め、広いパラメータ領域で信頼性と精度の高い結果が得られた。これにより、LCP とベータ関数の計算に必要な、パラメータ空間の広い領域での精度の高い測定が可能となる。それに基づいて計算した $N_F = 2$ QCD の LCP とベータ関数を、図 2 右図と図 3 に示す。

$N_F = 2 + 1$ 物理点 QCD と有限密度 QCD

この手法を応用して $N_F = 2 + 1$ 物理点 QCD や有限密度 QCD を研究するための準備も進めている（論文 12）。

我々が開発したる固定格子間隔アプローチに基づき、PACS-CS のゼロ温度シミュレーションと同じシミュレーション・パラメータを使って、 $T = 140\text{--}500$ MeV に相当する有限温度配位を系統的に蓄積している。これまでに生成した有限温度配位と、PACS-CS が公開しているゼロ温度配位や reweighting factor を用いて、Plaquette 期待値、Polyakov loop 期待値、さらに状態方程式の計算で必要となる QCD 作用の coupling parameter 微分の試験計算をおこない、

期待する振る舞いを確認した（図4左図）。これを発展させ、多重点再重み付け法や Gradient Flow 法を用いた物理点でのベータ関数の評価が次の課題である。

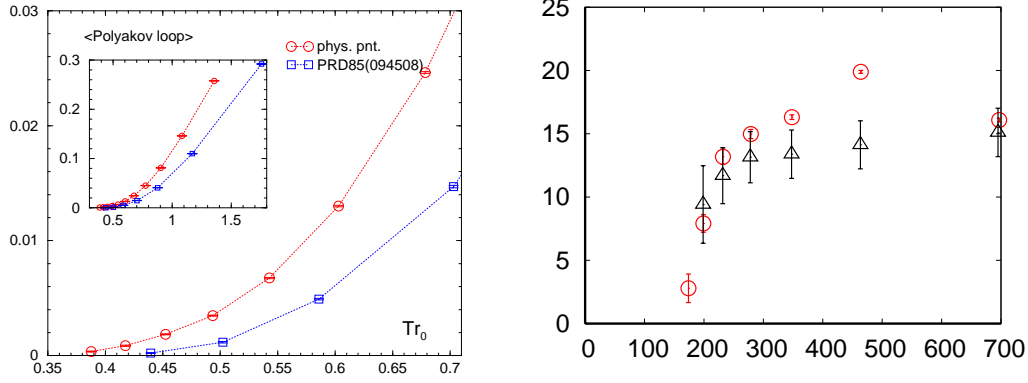


図 4: 左図：物理点における有限温度 QCD の配位で計算した Polyakov loop 期待値の温度依存性。以前の計算による比較的重いクォーク質量での結果も示す。クォーク質量が軽くなると相転移温度が下がる事が分かる。[論文 11] 右図：Gradient Flow 法による $N_F = 2 + 1$ QCD 状態方程式（中間結果）。縦軸は ϵ/T^4 、横軸は T [MeV]。赤丸が Gradient Flow 法の結果で、黒三角は T -積分法による以前の結果。

Gradient Flow 法による $N_F = 2 + 1$ QCD 状態方程式

近年 QCD 熱力学量の新しい計算方法として gradient flow を用いた方法が注目を浴びている。この方法では繰り込まれたエネルギー運動量テンソルを格子上で直接計算することが可能になり、エネルギー密度などの状態方程式を計算することができる。さらに gradient flow によるクーリングの効果によって、熱力学量における誤差の大部分を占めるゲージ配位の揺らぎが押さえられ、従来の積分法をベースとした計算手法に比べて、高精度の計算が可能になることが期待されている。

これまでにクエンチ近似では gradient flow を用いた計算が行われており、その有効性が示されている。動的クォークを含む作用での gradient flow の定式化は、M. Lüscher により行われており、full QCD でのエネルギー運動量テンソルの評価方法も H. Makino と H. Suzuki の論文で開発されている。さらに、カイラルオーダーパラメータや位相数の評価も gradient flow により容易になると期待されており、相構造などの研究にも大きな進展が期待される。我々は、これらを使って動的クォークを含む $(2+1)$ -flavor QCD における gradient flow を用いた QCD 熱力学量の計算を目的として、研究を進めている。そのための計算コードを、Bridge++をベースに開発した。

最初のステップとして、 $m_{PS}/m_V = 0.65$ のやや重いクォーク質量領域で $N_F = 2 + 1$ QCD の状態方程式の研究を開始した。固定格子間隔法を採用し、CP-PACS Collaboration で生成したゼロ温度配位と同じシミュレーション・パラ

メータを用い、 $T = 170\text{--}700\text{MeV}$ に相当する有限温度配位を生成している。図 4 右図に、gradient flow を用いた状態方程式計算の中間結果を示す。Makino-Suzuki による状態方程式（エネルギー・運動量テンソル）の評価方法では、flow time t についてゼロの極限を外挿する必要があるが、 $N_t \approx 4$ の高温格子以外では、安定した結果を得ることが出来た。図 4 右図で、赤丸が Gradient Flow 法によるエネルギー密度の結果で、黒三角は、 T -積分法により我々が以前計算した結果である。Gradient Flow 法による右端のデータ ($N_t = 4$) とその次のデータ ($N_t = 6$) では、 $t \rightarrow 0$ の外挿に不定性が有るが、その系統誤差はエラーバーに含まれていない。連続極限以外で Gradient Flow 法と T -積分法が一致する必然性はないが、有限の格子上で両者がほぼ一致していることは、方法の有用性を示唆している。

Gradient Flow 法による計算時間は、 T -積分法より大きく削減されている。次の目標は、異なる格子間隔での同様の計算を行い、連続極限を調べることである。最終的には、物理点での有限温度配位を用いたエネルギー運動量テンソルの測定を目指している。

(4) 格子 QCD による保存電荷の揺らぎと相関の研究

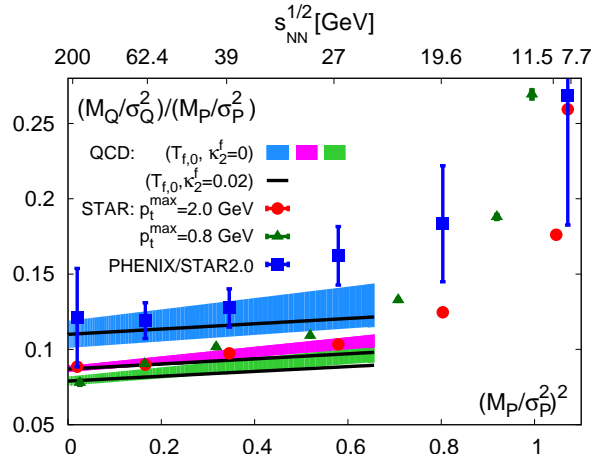


図 5: 総電荷揺らぎの平均と分散の比と総陽子数揺らぎの平均と分散の比の比の実験値（シンボル）と格子 QCD 計算（バンド及び線）との比較。

閉じ込め・非閉じ込め相転移の前後では、系の自由度がハドロンからクォークに変化する。保存電荷の揺らぎやそれらの間の相関は、この自由度の変化に敏感であり、相転移の性質を詳細に調べるのに有用である。

大野は、Frithjof Karsch 氏を中心とする BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration に参加し、2+1 フレーバーの Highly Improved Staggered Quark 作用を用いた格子 QCD シミュレーションにより、様々な保存電荷の揺らぎ及びそれらの間の相関に関する共同研究を行った。ここで、シミュレーションは複数の格子間隔にて行い、連続極限をとった。まず、300–700MeV の高温領域において、u,d,s クォークに対する対角及び非対角クォーク数感受率を 4 次のオーダーまで計算した。そして、得られた結果をいくつかの摂動計算と比較し、互いによ

く一致することを示した（論文 14）。また、温度と化学ポテンシャルに関するテイラー展開を用いて、総バリオン数及び総電荷の揺らぎの平均と分散を計算した。そして、その結果を STAR 及び PHENIX 実験の結果と比較し、バリオン化学ポテンシャルが 0 の極限での freeze-out 温度を決定するとともに、初めて、freeze-out line の曲率に制限を与えた（論文 16）。

(5) 有限温度格子 QCD によるクォークonium消失と重クォーク輸送の研究

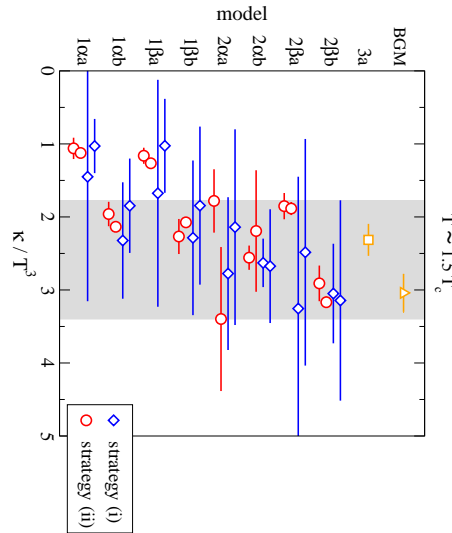


図 6: 様々なモデルに基づくスペクトル関数のフィットから得られた重クォーク運動量拡散係数の結果。灰色のバンドは最終結果を示す。

クォークoniumはチャームやボトムといった重クォークとその反クォークの束縛状態である。RHIC や LHC での相対論的重イオン衝突実験におけるクォークonium生成量の抑制は、クォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 生成を示す重要なシグナルの一つであり、クォークoniumの高温媒質中での振る舞いを理論的に理解することは、実験結果を説明する上で非常に重要である。また、QGP の流体力学的な性質も注目されており、流体モデルに基づく実験結果の説明には、QGP 中での重クォーク輸送現象の理論的理解が必要不可欠である。

大野は、York 大の Anthony Francis 氏、Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 氏、Bern 大の Mikko Laine 氏及び Jülich 計算センターの Thomas Neuhaus 氏らと共に、最大 $192^3 \times 48$ という非常に大きな格子を用いて pure SU(3) の格子 QCD シミュレーションを行い、連続極限における色電荷相関関数を計算した。そして、この相関関数に対して様々なモデルに基づくフィットを行い、スペクトル関数を計算し、そのゼロ周波数近傍の振る舞いから重クォーク運動量拡散係数 (κ) を見積もった。その結果、相転移温度の約 1.5 倍の温度 (T) において、 $\kappa/T^3 = 1.8 - 3.4$ という値を得た（論文 15）。また、Heng-Tong Ding 氏、Olaf Kaczmarek 氏、Swagato Mukherjee 氏及び Hai-Tao Shu 氏らとの共同研究により、相関関数からスペクトル関数を計算する方法として、確率論的な手法を導入し、クォークoniumのスペクトル関数の計算に向けた様々な予備的計

算を行った（論文 17）。今後は、より詳細な系統誤差の検証や既存の方法との比較等と共に、様々な温度におけるクォークoniumのスペクトル関数を計算し、クォークoniumの消失温度や重クォーク拡散係数の推定を行う。

(6) 3 フレーバー・2+1 フレーバー有限温度 QCD における相構造（藏増）

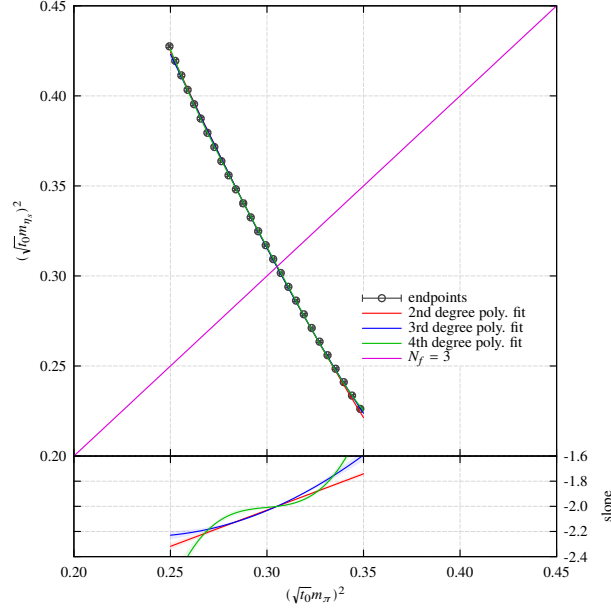


図 7: m_π^2 - m_η^2 平面における臨界終線。直線は SU(3) 対称点 ($m_\pi = m_\eta$) を表す。

温度 T とクォーク化学ポテンシャル μ を関数とする QCD の相図を確定させることは、格子 QCD シミュレーションにおける最大の目標の一つである。藏増は、理研計算科学研究機構（AICS）の宇川副機構長、中村研究員、金沢大学武田助教および米国アルゴンヌ国立研究所の Jin 研究員らとの共同研究のもと、 $O(a)$ 改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いて、 T 、 μ 、クォーク質量 m_q のパラメータ空間における 3 フレーバー QCD の臨界終線の決定に取り組んできた。まず、最初のステップとして $\mu = 0$ （密度ゼロ）における 3 フレーバー QCD における臨界終点を決定した（論文発表済）。われわれが用いた方法は、尖度 (kurtosis) 交叉法と呼ばれる有限サイズスケール解析手法の一種であり、一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。本研究は、世界で初めて 3 フレーバー QCD における臨界終点の決定に成功したものであり、QCD の相構造を理解する上での非常に重要な礎石となっている。

次のステップは 3 フレーバー QCD から 2+1 フレーバー QCD への拡張であるが、われわれはまず 3 フレーバー QCD の計算結果を用いた reweighting 法によって、3 フレーバー QCD の臨界終点近傍の臨界終線の振る舞いを調べた。ただし、今回は「時間方向」の格子サイズを $N_T = 6$ に固定している。図 7 は、 m_π^2 - m_η^2 平面における SU(3) 対称点近傍の臨界終線の振る舞いをプロットした

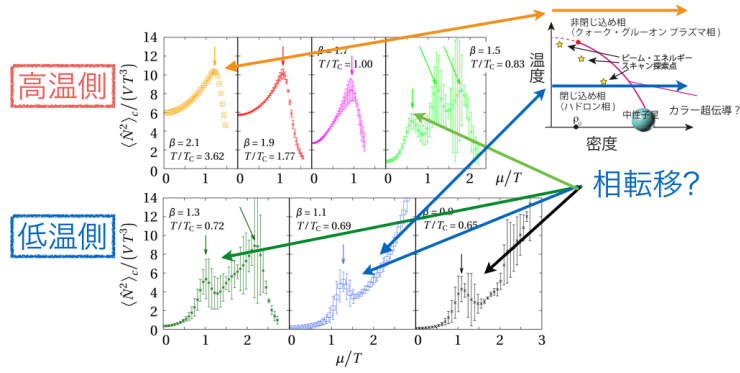


図 8: クォーク化学ポテンシャル μ/T の関数としてのクォーク数密度の 2 次キュムラント $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / (VT^3)$. グラフは上から高温側: $\beta = 2.1$ (orange), 1.9 (red), 1.7 (magenta), 1.5 (green), 1.3 (dark green), 1.1 (blue), 0.9 (black): 低温側。

ものである。紫色の直線は SU(3) 対称な点を表しており、それを横切る臨界終線の傾きは理論的に -2 になるはずであるが、われわれの結果も良い精度でそれを再現している。

(7) 有限密度 QCD の研究

鈴木と谷口は阪大の中村純氏、立教大の岡将太郎氏らと共同でカノニカル法を用いた有限密度 QCD の研究を行った。

有限密度格子 QCD には複素作用の問題、及びその派生としての符号問題と呼ばれる未解決の問題がある。この複素作用の問題を直接回避する方策として、カノニカル分配関数をフガシティ展開の係数として直接計算するカノニカル法と呼ばれる手法を採用した研究を行った。特に重いクォークに対して有効な hopping parameter 展開を採用することで、広い温度領域でカノニカル分配関数の計算を行った。

物理量としては、クォーク数密度とその高次のキュムラントの計算を主に行った。特にクォーク数の揺らぎに相当する 2 次のキュムラントには $T < T_c$ の低温側において相転移に特有なピーク構造が現れていることが見て取れる (図 8)。更に 2 次と 1 次のキュムラントの比 $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / \langle \hat{N} \rangle$ について計算を行った (図 9)。これはハドロンレゾナンスガス模型及びクォークガス模型との比較が明確な量であるが、注目すべきポイントは、特に $T < T_c$ の低温側での振る舞いである。低密度側ではハドロン模型の予言とよく一致している一方で、密度を上げて行くに従って、ハドロン模型からはずれて、クォーク模型の予言に近づいていく様子が見て取れる。高温側では一貫してクォーク模型の予言とよく一致していることと比較するとこれは著しい違いである。これは、低温側で密度を上げて行くに従って、QCD 相図のクォークの閉じ込め - 非閉じ込め相転移の境界をまたいで行く現象と考えられる。最後に 2 次のキュムラントに現れたピークの位置から QCD の相図を類推したものが図 10 である。

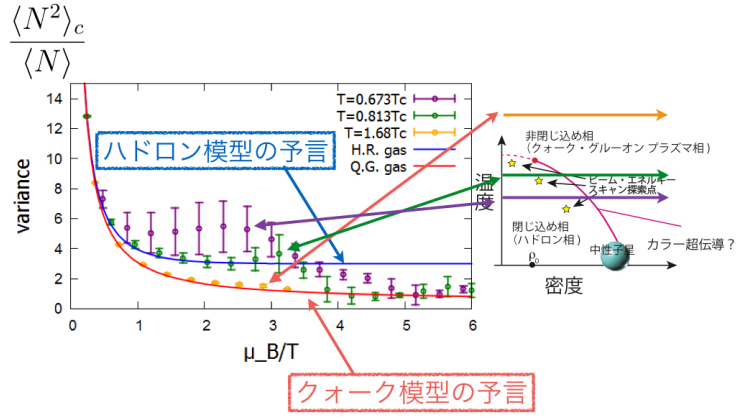


図 9: バリオン化学ポテンシャル μ_B/T の関数としてのクォーク数の 2 次キュムラントとクォーク数の比 $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / \langle \hat{N} \rangle$. ハドロンレゾナンスガス模型（青線）及びクォークガス模型（赤線）との比較を行っている。

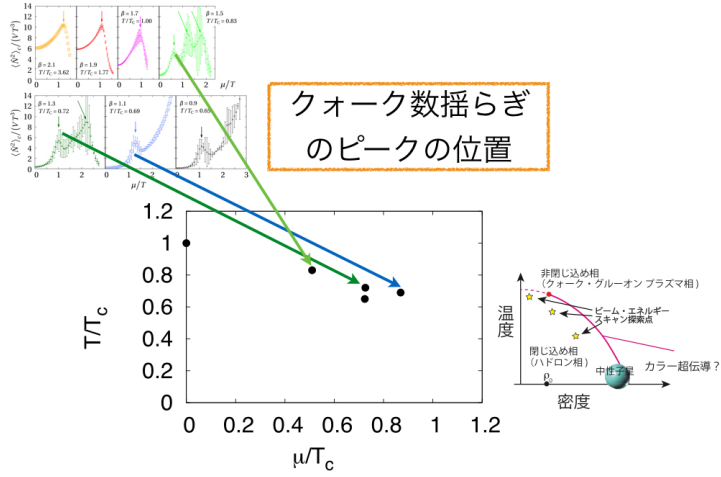


図 10: クォーク数揺らぎに現れるピークの位置から類推した QCD 相図。

(8) テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

格子 QCD 計算では、近年の計算機能力の向上や新規アルゴリズムの開発・改良の結果、自然界の u 、 d 、 s クォーク質量上でのシミュレーションや、更には軽原子核の束縛エネルギー計算までもが可能となりつつある。その一方で、解決すべき長年の課題がそのまま残されていることも事実である。最も重要な課題は、フェルミオン系を扱う際の負符号問題および複素作用を持つ系のシミュレーションである。これらは、軽いクォークのダイナミクス、Strong CP 問題、有限密度 QCD の研究において避けて通れない問題である。われわれは、近年物性物理分野で提案されたテンソルネットワーク形式に基づく分配関数の数値計算手法を格子ゲージ理論へ応用し、モンテカルロ法に起因する負符号問題および複素作用問題を解決し、これまでの格子 QCD 計算が成し得なかった新たな物理研究の開拓を目指している。

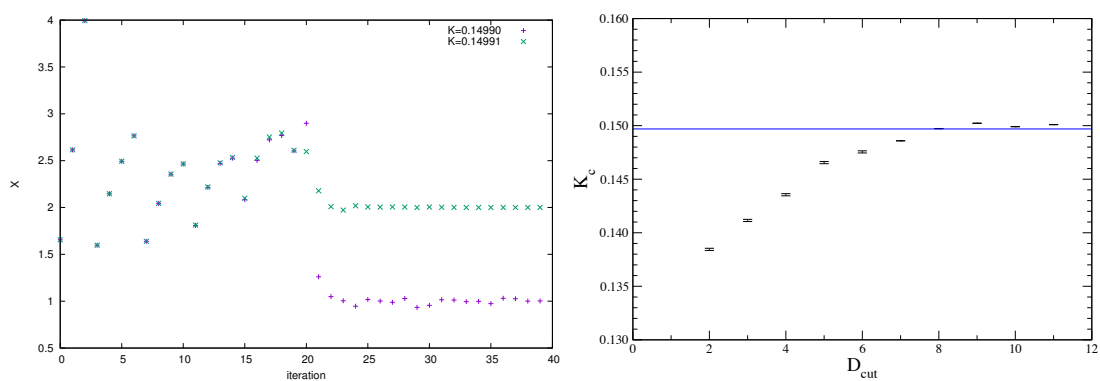


図 11: 1024^4 格子サイズにおける 4 次元イジングモデルの相転移温度の決定。左図: $D_{\text{cut}}=10$ におけるテンソルの固有値の縮重度による高温相 (縮重度 1) と低温相 (縮重度 2) の同定。右図: 転移温度の D_{cut} 依存性。青い横線はモンテカルロ法による計算結果を表す。

これまで、藏増と理研計算科学研究機構 (AICS) の清水特別研究員は、テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し (グラスマンテンソル繰り込み群)、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、 θ 項が有る場合と無い場合の 1 フレーバーの 2 次元格子 Schwinger モデル (2 次元格子 QED) における相構造を調べた (論文発表済)。この研究により、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が抱える負符号問題や複素作用問題を解決していることを示すことに成功した。今後は、最終目標である 4 次元 QCD への応用に向け、(i) 非可換ゲージ理論への拡張、(ii) 高次元モデルへの応用、(iii) 物理量計算のための手法開発、という 3 つの課題に取り組む必要がある。2015 年度において特に進展があった研究は、テンソル繰り込み群を用いた 4 次元イジングモデルの解析である。図 11 は、 1024^4 格子サイズにおける 4 次元イジングモデルの相転移温度計算を表している。まず、各 D_{cut} (テンソル繰り込み群において計算精度をコントロールするパラメータ) において、テンソル固有値の縮重度を調べることによって相転移温度を決定する。左図では $D_{\text{cut}}=10$

の例をプロットしている。その後、相転移温度の D_{cut} 依存性において収束の様子を調べることによって、最終的な相転移温度を決定する（右図）。青い横線はモンテカルロ法の結果を表しているが、テンソル繰り込み群の結果も近い値に収束していることがわかる。ただし、従来のモンテカルロ計算における最大格子サイズは 80^4 であり、今回のわれわれの計算における 1024^4 格子サイズに比べて非常に小さい。テンソル繰り込み群における計算コストの体積依存性は対数的であり、この点もモンテカルロ法にくらべて圧倒的な優位性を持つ特徴の一つである。

(9) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

藏増、山崎は理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そのうち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであった。その後、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを行い、近似を排したより現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算に成功した。ただし、この計算は π 中間子質量 0.5 GeV 相当のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (π 中間子質量 0.14 GeV に相当) よりもかなり重い。そのため、物理点へ向けたクォーク質量依存性を調べるために、広島大学 石川健一准教授を共同研究者に加え、 π 中間子質量 0.3 GeV 相当のクォーク質量での計算を遂行した。この研究成果は、本年度、学術論文に掲載された (論文 22, 23)。この成果を踏まえ、「京」で生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた物理点での軽原子核束縛エネルギー計算を行なっている。 ^3He 原子核の束縛エネルギーに対応する有効エネルギー差の中間結果を図 12 に示す。物理点での計算では統計誤差を抑えることが非常に難しいため、現段階では統計的に有意な結果は得られていないが、今後統計誤差を小さくするための計算を継続していく。

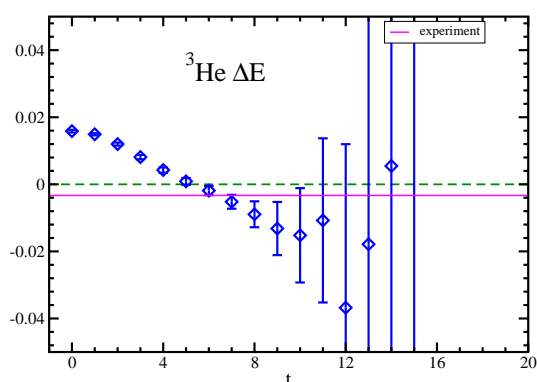


図 12: ^3He 原子核の有効エネルギー差。横軸は虚時間、実線は実験値。大きな虚時間領域で、有効エネルギー差が定数になれば、その値が束縛エネルギーに対応する。

(10) 格子 QCD を用いた核子構造研究

陽子と中性子(核子)はクォークの束縛状態であり、その構造を詳細に調べるためには、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いた計算が必要である。これまでに格子 QCD を用いて、核子構造に関する核子形状因子の研究が行なわれてきたが、非常に良い精度で測定されている実験値を再現できていない。この実験値との不一致の主な原因は、計算に用いられたクォーク質量が現実のものよりも大きいためであると考えられている。

藏増、山崎は、広島大学 石川健一准教授、東北大学 佐々木勝一准教授、理研 計算科学研究機構 (AICS) 宇川副機構長とともに、PACS Collaboration において、この原因を取り除いた計算である、現実のクォーク質量に極めて近いパラメータ (π 中間子質量 145MeV) での核子形状因子計算を行なった(論文 23)。図 13 は電氣的核子形状因子の中間結果である。これまでの計算結果とは異なり、実験値に良く一致した結果が得られている。今後もこの計算を進め、磁氣的形状因子や軸性カレントに関する形状因子の研究を行なっていく予定である。

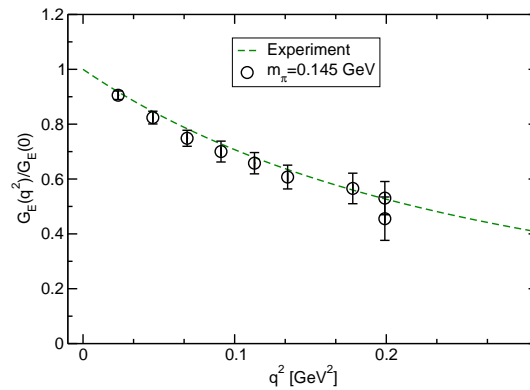


図 13: 電氣的核子形状因子。横軸は運動量移行、破線は実験値を表す

(11) 素粒子標準模型を超えた理論の探索

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補である。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子標準模型では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる。しかし、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称性を持つなど、特殊な条件が課されている。山崎は名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) を中心とした LatKMI Collaboration の研究者、山脇幸一特別教授、青木保道准教授らと共に、格子ゲージ理論を用いた数値計算から、そのような条件を満たすゲージ理論が存在するかの探索を行った。これまでの 4 (論文 24)、8、12 フレーバー SU(3) ゲージ理論の研究から、8 フレーバー理論がそれら条件を満たす可能性がある事を示した(論文 25)。その可能性を確かめるため、様々なハドロン質量(論文 26)、S パラメータ(論文 27)、トポロジカルチャージに関係した物理量(論文 28, 29)を計算し、8 フレーバー理論の性質をより明確に理解するための研究を行った。

(12) コンフォーマル理論の数値的研究

素粒子標準模型を越える理論の候補であるウォーキングテクニカラー模型は、コンフォーマル対称性をもった理論をベースに構築され则认为られている。WMFQCD Collaboration (岩崎 (筑波・KEK)、石川 (広島)、中山 (Walter Burke Institute), 野秋, Cossu (KEK)、吉江) は、QCD 的な場の理論 (N_f 個の基本表現のフェルミオンが結合した $SU(3)$ ゲージ理論) のコンフォーマル対称性に関する理論構造の解明を目的に研究を行っている。繰り込み群等に基づく理論的な考察と、それを検証する為の格子シミュレーションを研究手段としている。前年度までに、「有限の IR cutoff を持つコンフォーマル理論」という、新概念を提唱し、その理論の特徴を明らかにしてきた。つまり、

- ゲージ結合定数が IR fixed point (赤外固定点) を持つ理論を、有限の IR cutoff を持つ時空 (例えば、空間方向のサイズが有限な時空) 上で定式化すると、IR cutoff が無い理論ではフェルミオン質量 m_f がゼロでのみ実現する conformal 対称性が、有限の m_f へ広がり、「閉じ込め相」とも「非閉じ込め相」とも異なる「conformal 領域」が存在すること、
- 「conformal 領域」での meson 伝搬関数 $G(t)$ (空間運動量 $\vec{p} = 0$) は、変形湯川型

$$G(t) \sim C \exp(-mt)/t^\alpha$$

となる (閉じ込め相では指数関数型 $G(t) \sim C \exp(-mt)$) こと、

- conformal 領域の真空は、空間方向の Polyakov Loop が非自明な $Z(3)$ 位相をもつ "twisted $Z(3)$ vacuum" であること

を理論的・数値的に示した。(後 2 者は、conformal 領域の特徴。) QCD 的理論の理論構造としては、

- $N_f = 7, 8, 12, 16$ の系でコンフォーマル領域が存在することから、QCD 的理論 (ゼロ温度) の conformal window は $N_f = 7 - 16$ であること、
- $N_f = 2$ の有限温度 QCD においても、高温相に conformal 領域が存在すること

などを明らかにした。

本年度は、ゼロ温度の QCD 的理論に対して、IR fixed point を同定する新手法を提案し、 $N_f = 7, 8, 12, 16$ の格子シミュレーションで実際に IR fixed point を求めた (論文 30)。新手法は、繰り込み群に基づく。サイズ (IR cutoff) の異なる時空上の meson 伝搬関数に関する繰り込み群方程式から出発し、伝搬関数 (から定義される有効質量 $m(t)$) のスケーリング則が導かれる。つまり、 $m(t)$ は、時間 t (と有効質量自身) をサイズでスケールすると、IR fixed point 上 ($m_f = 0$) では、サイズに依存しないユニバーサルな関数となる。この手法の検証のため、 $N_f = 7, 8, 12, 16$ の理論に対して、Iwasaki ゲージ作用と Wilson フェルミオン作用を用いた格子シミュレーションを 3 つの格子サイズ $8^3 \times 32$, $12^3 \times 48$, $16^3 \times 64$ で、結合定数を変えながら行い、「特定の結合定数の時 (の

み)、スケールした meson 有効質量がサイズによらない」ことを示した。つまり、IR fixed point を同定できた。伝搬関数のスケーリング則から、異常質量次元を求める事ができるが、数値的に意味のある結果を得るには、より大きなサイズの計算が必要であり、今後の課題である。

$N_f = 2$ 高温相のコンフォーマルの性質の解明についても進展があった(論文 32)。昨年度までは、時間方向(温度方向)のサイズ L_t が空間方向のサイズ L_s より大きい系に対して、conformal 領域の存在を示してきたが、正しい有限温度系である $L_t < L_s$ の系に対しても conformal 領域が存在する事を示した。具体的には、Polyakov loop と meson 有効質量を測定し、 $m_f = 0$ で、Z(3) twisted state が実現している事を示した。

今年度は、さらに domain wall quark を用いたシミュレーションによるコンフォーマル理論の研究も推進し、中間結果を、国際会議で報告した(論文 [?])。domain wall quark では、質量のチューニングが不要であり、カイラル対称性の破れ/回復の直接検証が可能である点で、Wilson quark の計算より優位である。計算はゼロ温度 $N_f = 8$ で行い、Wilson quark に対して行ってきた前述の解析を行うとともに、ディラックスペクトル密度の解析から異常質量次元を見積もる試みも行っている。

(13) 格子 QCD によるバリオン間相互作用の研究 (HAL QCD Collaboration)

陽子および中性子(核子)を結びつけ、原子核を構成している力(核力)は、現象論的には中間子交換によって生じると考えられているが、その起源をより基本的なクォーク・グルーオンの自由度に基づいて理解すること、とりわけ短距離核力における斥力芯の発現機構を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の1つである。根村、佐々木は、京都大学基礎物理学研究所青木教授、理化学研究所初田主任研究員らと HAL QCD Collaboration を結成し、2核子間の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を応用して、様々な粒子間のポテンシャルを格子 QCD の数値シミュレーションで計算してきた。論文 34 では、PACS-CS によって生成されたゲージ配位のうち、格子間隔 $a = 0.09$ fm、空間体積 $L^3 = (2.9\text{fm})^3$ 、 $m_\pi \approx 700$ MeV、 $m_\Omega \approx 1970$ MeV のものを用いて 1S_0 チャネルの $\Omega\Omega$ ポテンシャルの計算を行った。論文 35 では、CP-PACS/JLQCD によって生成されたゲージ配位を用いて、空間体積 $L^3 = (1.93\text{fm})^3$ におけるフレーバ $SU(3)$ 対称性が破れたクォーク質量 ($m_\pi/m_K = 0.96, 0.90, 0.86$) でのストレンジネス $S = -2$ セクターの結合チャネルバリオン間ポテンシャルの計算を行った。以下では、格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定に関連して行われた 2015 年度の研究成果を紹介する。

格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定

格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定は、京速計算機などの大規模な計算機資源を活用して計算が行われた。この研究課題には、ストレンジネスを持たない核力ポテンシャルと、ストレンジネスを持ったハイペロンポテンシャルの両方が含まれる。核力については、これまでに豊富な実験データ

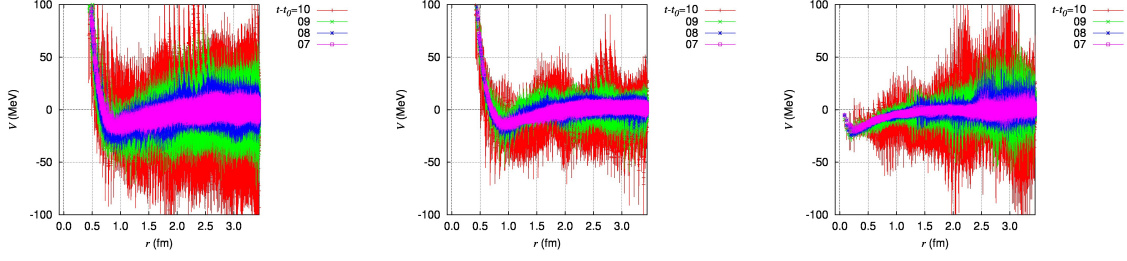


図 14: 体積 $(96a)^4 \approx (8.2\text{fm})^4$ 、格子間隔 $a \approx 0.085\text{fm}$ 、 $(m_\pi, m_K) \approx (146, 525)\text{MeV}$ に対応するほぼ物理点上で計算された、 $\Lambda N - \Lambda N$ 対角成分のポテンシャルを示す。色の違いは格子上で測定された虚時間の違いを示している。左: 1S_0 チャンネルにおける中心力ポテンシャル。中央: 3S_1 - 3D_1 チャンネルにおける中心力ポテンシャル。右: 3S_1 - 3D_1 チャンネルにおけるテンソル力ポテンシャル。

に基づいて現象論的には精密に調べられているため、この研究課題で用いる方法によって、これまでの核力ポテンシャルに対する理解と矛盾しない結果が得られることを検証するという側面がある。いっぽう、ハイペロンポテンシャルについては、実験データが限られている、もしくはほとんど実験からの情報が無いため、この研究課題で得られる結果は、従来の現象論的なモデルとは異なり、パラメータフリーの予言を与えるという重要な成果が期待される。従って、貴重な計算機資源をできるだけ有効活用するために、2+1 フレーバの格子 QCD 計算で引き出すことのできるアイソスピン対称性を持った八重項バリオン間相互作用の情報をすべて求められるように、以下に示す 52 チャンネルの 4 点相関関数を一度の計算ジョブで同時に計算するようにプログラムを準備した上で計算を開始している。

$$\begin{aligned}
&\langle p n \bar{p} \bar{n} \rangle, \\
&\langle p \Lambda \bar{p} \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle p \Lambda \bar{\Sigma}^+ \bar{n} \rangle, \quad \langle p \Lambda \bar{\Sigma}^0 \bar{p} \rangle, \\
&\langle \Sigma^+ n \bar{p} \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^+ n \bar{\Sigma}^+ \bar{n} \rangle, \quad \langle \Sigma^+ n \bar{\Sigma}^0 \bar{p} \rangle, \\
&\langle \Sigma^0 p \bar{p} \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0 p \bar{\Sigma}^+ \bar{n} \rangle, \quad \langle \Sigma^0 p \bar{\Sigma}^0 \bar{p} \rangle, \\
&\langle \Lambda \Lambda \bar{\Lambda} \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Lambda \Lambda \bar{p} \bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Lambda \Lambda \bar{n} \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Lambda \Lambda \bar{\Sigma}^+ \bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Lambda \Lambda \bar{\Sigma}^0 \bar{\Sigma}^0 \rangle, \\
&\langle p \Xi^- \bar{\Lambda} \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle p \Xi^- \bar{p} \bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle p \Xi^- \bar{n} \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle p \Xi^- \bar{\Sigma}^+ \bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle p \Xi^- \bar{\Sigma}^0 \bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle p \Xi^- \bar{\Sigma}^0 \bar{\Lambda} \rangle, \\
&\langle n \Xi^0 \bar{\Lambda} \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle n \Xi^0 \bar{p} \bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle n \Xi^0 \bar{n} \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle n \Xi^0 \bar{\Sigma}^+ \bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle n \Xi^0 \bar{\Sigma}^0 \bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle n \Xi^0 \bar{\Sigma}^0 \bar{\Lambda} \rangle, \\
&\langle \Sigma^+ \Sigma^- \bar{\Lambda} \bar{\Lambda} \rangle, \langle \Sigma^+ \Sigma^- \bar{p} \bar{\Xi}^- \rangle, \langle \Sigma^+ \Sigma^- \bar{n} \bar{\Xi}^0 \rangle, \langle \Sigma^+ \Sigma^- \bar{\Sigma}^+ \bar{\Sigma}^- \rangle, \langle \Sigma^+ \Sigma^- \bar{\Sigma}^0 \bar{\Sigma}^0 \rangle, \langle \Sigma^+ \Sigma^- \bar{\Sigma}^0 \bar{\Lambda} \rangle, \\
&\langle \Sigma^0 \Sigma^0 \bar{\Lambda} \bar{\Lambda} \rangle, \langle \Sigma^0 \Sigma^0 \bar{p} \bar{\Xi}^- \rangle, \langle \Sigma^0 \Sigma^0 \bar{n} \bar{\Xi}^0 \rangle, \langle \Sigma^0 \Sigma^0 \bar{\Sigma}^+ \bar{\Sigma}^- \rangle, \langle \Sigma^0 \Sigma^0 \bar{\Sigma}^0 \bar{\Sigma}^0 \rangle, \\
&\quad \langle \Sigma^0 \Lambda \bar{p} \bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0 \Lambda \bar{n} \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0 \Lambda \bar{\Sigma}^+ \bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0 \Lambda \bar{\Sigma}^0 \bar{\Lambda} \rangle, \\
&\langle \Xi^- \Lambda \bar{\Xi}^- \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Xi^- \Lambda \bar{\Sigma}^- \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Xi^- \Lambda \bar{\Sigma}^0 \bar{\Xi}^- \rangle, \\
&\langle \Sigma^- \Xi^0 \bar{\Xi}^- \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^- \Xi^0 \bar{\Sigma}^- \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^- \Xi^0 \bar{\Sigma}^0 \bar{\Xi}^- \rangle, \\
&\langle \Sigma^0 \Xi^- \bar{\Xi}^- \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0 \Xi^- \bar{\Sigma}^- \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0 \Xi^- \bar{\Sigma}^0 \bar{\Xi}^- \rangle, \\
&\langle \Xi^- \Xi^0 \bar{\Xi}^- \bar{\Xi}^0 \rangle,
\end{aligned}$$

2015 年度中では、上記八重項に加えて、強い相互作用による崩壊チャネルの開かない (従って現在の方法で安全にポテンシャルを求められる) $\Omega\Omega$ チャネルも加えた大規模計算がすすめられた。データが膨大であるため解析もまだ進行中であるが、予備的な結果の一例として、 ΛN の中心力及びテンソル力ポテンシャルを図 14 に示す。

(14) 格子 QCD 研究用データグリッド JLDG/ILDG の運用

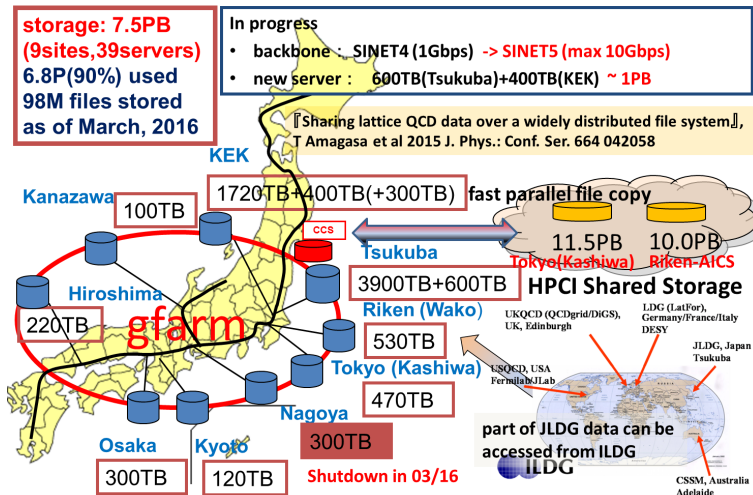
JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の計算素粒子物理研究グループが日々の研究データを管理・共有する為のデータグリッドである。主システムは、国内の主要な格子 QCD 研究拠点 9 箇所に設置したファイルサーバを国立情報学研究所が提供する SINET VPN で接続し、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm で束ねたファイルシステムである。どの拠点からアクセスしても同一のファイルシステムが見えるので、「ある拠点のスパコンで生成したデータ (格子 QCD 配位など) を JLDG に投入・蓄積し、別拠点で読み出して、その拠点のスパコンで再解析 (物理量の計算) をおこなう」といったデータ共有を、容易におこなう事ができる。また、サブシステムとして、HPCI 共用ストレージとの連携システムと ILDG (International Lattice Data Grid) との接続システムを備えている (図 参照)。JLDG の運用は、各拠点の代表者、研究グループの代表者、システム開発者、管理運用支援の委託先の業者の担当者、をメンバーとする JLDG チームが行っており、筑波大からは、建部、天笠 (システム情報) と山崎、吉江が参加している。

JLDG は 2005 年に開発を開始し、2007 年から運用している。JLDG は、一昨年度まではシステムの改良や新機能の実装をおこなって、その利便性が向上してきたが、昨年度からは、システムの増強・安定運用に主眼が移ってきている。また、国内の複数の大きな研究グループが研究インフラとして JLDG を使用している。この事から、JLDG が実用システムとして、一定の完成の域に達したと判断し、この段階でのシステムとその運用についての記録と国内外への広報の目的で、国際会議 CHEP2015 にて JLDG の総合報告をおこなった (論文 33)。

今年度は、以下のシステム増強と安定運用の為の活動をおこなった。

- ファイルサーバの増強:前年度 28 サーバ 5.0PB から 39 サーバ 7.5PB へ
- 管理機器更新 (JLDG 2 件、ILDG 2 件)
- Gfarm 更新 (4 回)
- SINET5 への移行対応: 一部拠点で 1Gbps から 10Gbps へ増速
- ファイルサーバの個別障害対応

ILDG は、世界 5 地域に構築された Lattice QCD 用のデータグリッドを、Lattice QCD の基礎データ (配位) の共有を目的として、相互運用を可能にする Grid of Grids である。JLDG は ILDG の日本地域グリッドである。また、日本から



は、ILDG の board member として藏増が、Metadata working group member として吉江が参加している。また、もうひとつの Middleware working group には 天笠（システム情報）がメンバーとして参加するとともに、吉江もオペレータとして参加しユーザーサイドからの提言等をおこなっている。ILDG は、2007 年の運用開始依頼、細かな改良はあるものの、主要部分は安定した運用を続けている。

ILDG には、運用開始当初から「公開されている格子 QCD 配位アンサンブルの利用状況を把握する仕組みが無い」事が問題であった。論文の引用・被引用の記録とは別に、データの引用・被引用関係の記録を蓄積できれば、それを用いて、その配位データの有用性を測る資料となりうるし、ひいては、データ共有の為に ILDG の有用性を示す資料ともなりうる。この事は、格子 QCD 配位データに限った問題ではなく、多くの研究分野が、データの引用・被引用関係を把握するニーズを持っている。このような背景の下で、学术论文の出版界で広く用いられている『DOI(DigitalObjectIdentifier) 登録』の仕組みを研究データにも用いる試みが始まっている。ILDG でも、『格子 QCD アンサンブルへの DOI 登録』を行い、High Energy Physics 分野の最大の情報システムである INSPIRE-HEP を用いて、アンサンブルの引用・被引用関係を把握できる仕組みを構築する提案がなされ、2015 年 4 月の ILDG workshop で、各地域グリッドで検討する事となった。

この合意を受け、日本では、天笠、松古 (KEK)、吉江が中心となって、DOI 登録の体制面の検討 (DOI 登録機関との協議、関係機関との協議と DOI 登録実施体制とフローの検討) をおこなうとともに、DOI 登録に必要な実作業 (Metadata と landing page の ILDG ensemble/configuration metadata からの半自動生成) の試行に着手した。

(15) 格子 QCD 共通コード開発

昨年度に引き続き、格子 QCD 共通コード Bridge++ の開発を進めた (論文 37, 38)。格子 QCD 共通コード Bridge++ は、QCD を含む格子ゲージ理論

シミュレーションのための汎用コードセットである。様々な格子作用やアルゴリズムを適用可能で、ノート PC から超並列計算機まで幅広いアーキテクチャに対応している。2012 年 7 月に Bridge++ ver.1.0.0 を公開して以降、継続してコードの改善、拡張を行っている (<http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>)。素粒子理論グループからは、金谷、滑川、根村、谷口、浮田が参加している。

本年度は、一般化フェルミオンの追加、FFT 対応、XML 形式の導入などを行った。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.3.0 へのメジャーアップデートが 2015 年 10 月に実施された。その後も、コードの細かい改定、改良が進められている。最新版は ver.1.3.2 である。なお、共通コードを使用した研究論文が、今年度新たに 9 本追加された。通算 13 本の論文が共通コードを元に発表されている。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、佐藤 勇二、毛利 健司)

(1) Sine-square deformation と共形場の理論

一次元スピン系において、隣のスピンの相互作用を位置のサイン関数の 2 乗に比例するようにとった場合、その基底状態は相互作用が位置に寄らない場合と一致することが桂 (東大) らの研究によってわかっている。石橋は多田 (理研) とともに、この現象を共形対称性がある場合について調べた。相互作用をサイン関数の 2 乗にとった場合と定数の場合は、ある共形変換で結びついていることを示し、この共形変換から基底状態等の性質が理解できることを示した (論文 39)。また、この理論に現れる演算子・状態の性質を調べた (論文 40)。

(2) ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論の研究

重力理論とゲージ理論の双対性により、planar 極限での 4 次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅は、反ドジッター時空中の光的境界を持つ極小曲面の面積で与えられる。この散乱振幅は光的経路からなるウィルソンループの真空期待値と等価である。これまでの研究により我々は、双対性の背後に現れる可積分模型を用いて強結合散乱振幅を解析的に求める方法を定式化してきた。

佐藤は Z. Bajnok, J. Balog, G.Z. Toth (Wigner Research Centre), 伊藤 (東京工業大学) と共に、量子可積分系を解析する新たな手法を開発し、2 次元的な運動量を持つ粒子の 10 点強結合散乱振幅を与える可積分模型である $su(3)_2/u(1)^2$ 等質サインゴルドン模型の厳密な質量-結合関係式を導いた。これは、複数のスケールを持つ量子可積分模型に対する初めての結果であり、当該分野の 20 年来の問題を解決するものである。また、この質量-結合関係式により、対応する強結合散乱振幅を解析的に評価する我々の定式化が完結した (論文 41)。

(3) コヒーレント状態を用いた行列幾何の研究

超弦理論の非摂動的定式化として期待されている行列模型では、弦や D ブレーンといった物体は、行列幾何と呼ばれる離散的な幾何の枠組みにより記述され

る。しかし、この行列幾何の性質はこれまで深く理解されていなかった。伊敷はこの幾何の構造を理解する手法として、量子力学のコヒーレント状態を用いた新たな方法を提案した（論文 42）。この方法により離散的な行列幾何から、計量や曲率といった弦や D ブレーンの微分幾何学的な情報を得ることが出来るようになった。また伊敷と村木は大学院生の松本とともに、この方法を用いて行列幾何の構造を調べた（論文 43）。その結果、特定の行列幾何はケーラー構造と呼ばれる非常に良い性質の構造を持つことが示された。また、このケーラー構造と行列の配位を直接結びつける関係式が得られた。

(4) 弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

弦の理論は散乱振幅が摂動論を用いて有限に計算できることが知られているが、発散は相殺するのであり、最初からないわけではない。従って、点粒子の場の理論と同様に、うまい正則化の方法を考えることは重要である。特に超弦の場の理論においてはコンタクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上（釧路高専）らとのこれまでの研究で、次元正則化を用いた計算により、tree 振幅については第一量子化の計算と一致する結果を得ることができるとを示している。今年度は超弦の場合にこの結果を拡張するため、非臨界次元の超弦に現れる世界面上の理論の相関関数の計算を行った（論文 44）。

(5) 弦理論における非幾何学的背景時空と宇宙項問題

弦理論の対称性である弦双対性により、リーマン幾何学的な時空描像を超える非幾何学的な時空も弦理論の背景時空として可能となる。このような背景時空 (T-fold/monodifold) は典型的には真空のモジュライが弦スケールの場合に可能となる。

佐藤は菅原、和田（立命館大学）と共に、共形場理論に基づき弦スケールでも有効な非幾何学的背景時空の解析を進めた。まず、共形対称性を保つ共形場理論の界面（共形界面/conformal interface）を用いて非幾何学的背景時空中の弦に対する新しいタイプのモジュラー不変な分配関数を構成した（論文 45）。また、このような構成を拡張し、T-fold タイプの非幾何学的背景中の弦理論では、時空の超対称性が破れているにも拘らず 1 ループでの宇宙項が消える、現象論的に興味深いモデルが容易に構成できることを示した（論文 46）。

(6) ゲージ/重力対応の数値的検証

伊敷は京大基研の花田正範准教授、茨城大学の百武慶文准教授、KEK の西村淳准教授らとともに、ゲージ/重力対応の数値的検証を行った（論文 47）。伊敷らは超弦理論との等価性が予想される 1 次元のゲージ理論の数値計算を行い、内部エネルギー等の熱力学量を求め、得られた結果を超弦理論のものと比較した。その結果、ゲージ/重力対応が確かに成立しているという強い証拠を得ることが出来た。この研究では、ゲージ群のランクが比較的大きい場合と小

さい場合の両方が調べられた。ランクが大きい場合の計算はすでに他の先行研究でも行われていたが、伊敷らはその結果をさらに精密化した。一方、ランクが小さい場合の先行研究はこれまでに行われておらず、この研究によってはじめて対応が検証された。

(7) 一般化幾何学の研究

超重力理論の NSNS 部分は、時空の計量、Kalb-Ramond 場とディラトン場からなる。一般化幾何学は、これらの場に幾何学的理解を与える。すなわち、接束と余接束からなる直和束の上に、時空の計量と Kalb-Ramond 場の幾何学的な記述を実現している。弦理論では、これらの場の適当な配位を背景として、その中での弦の運動を考察する。異なる背景同士で弦の運動が非自明に等価になる関係として、T 双対性が知られている。時空の計量と Kalb-Ramond 場を同等に扱う一般化幾何学は、この T 双対性を含めて幾何学的に記述すると期待される。形式的に T 双対性変換を施すと、これまで考えられてこなかったような場の配位が得られる。特に興味深いのは、既存の幾何学では捉えきれない「非幾何学的」な場の配位が出現するという議論である。一般化幾何学は T 双対性を含めて背景場の幾何学的記述を与えることから、これを用いて非幾何学的な背景を「幾何学的」に理解しようという議論がなされている。

村木は一般化幾何学において接束と余接束の役割を入れ替えた変種を導入し、非幾何学的背景の理解を探究した。特に一般化幾何学の変種に基づく重力を構築し、非幾何学的背景と重力場との結合を明らかにした (論文 48)。

(8) 弦をプローブとしたエキゾチックブレーンの背景時空の研究

エキゾチックブレーンは低次元時空の超弦理論に登場する特殊なブレーンである。背景時空は一般座標変換だけでは捉えられず、超弦理論の双対性の構造が含まれる。この様なブレーンや背景時空は、超弦理論のコンパクト化とそこから得られる素粒子物理を包括的に理解するために重要である。エキゾチックブレーンの一例である 5_2^2 ブレーンは NS5 ブレーンに対して 2 回 T 双対変換することで登場する。木村は、2013 年に 5_2^2 ブレーン背景時空を 2 次元超場形式を用いたゲージ理論を用いた定式化を成功させていた。2 次元超場形式では T 双対変換に対応する Legendre 変換を正しく実行するために可約な超場を導入していたが、可約であるため多くの余分な成分場が登場する。そのため、超対称ゲージ変換によって物理的自由度だけが生き残る正しいゲージ固定条件を発見した (論文 49)。このゲージ固定は、局所化定理を用いた 2 次元超対称ゲージ理論の経路積分を評価する際に重要である。

〈論文〉

1. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa, Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D92 (2015) ref. 014501.

2. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Curvature of the critical line on the plane of quark chemical potential and pseudoscalar meson mass for three-flavor QCD, Phys. Rev. D92 (2015) ref. 114511.
3. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, Phase structure of $N_f = 3$ QCD at finite temperature and density by Wilson-Clover fermions, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 145.
4. N. Nakamura, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, S. Takeda, and A. Ukawa, Towards the continuum limit of the critical endline of finite temperature QCD, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 160.
5. H. Suno, Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, Y. Futamura, A. Imakura, and T. Sakurai, Eigenspectrum Calculation of the Non-Hermitian $O(a)$ -Improved Wilson-Dirac Operator using the Sakurai-Sugiura Method, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 026.
6. Hirokazu Kobayashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Yoshinobu Kuramashi, Optimization of Lattice QCD with CG and Multi-Shift CG on Intel Xeon Phi Coprocessor, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 029.
7. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, Mass and Axial Current Renormalization in the Schrödinger Functional Scheme for the RG-Improved Gauge and the Stout Smeared $O(a)$ -Improved Wilson Quark Actions, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 271.
8. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, 2+1 Flavor QCD Simulation on a 96^4 Lattice, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 075.
9. N. Ishizuka, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshie, Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved Wilson fermion action in lattice QCD, Phys. Rev. D92 (2015) 074503.
10. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state, PoS (LATTICE 2014) (2015) 222.
11. R. Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, D. Yamamoto, and T. Umeda, Multipoint reweighting method and its applications to lattice QCD, Phys. Rev. D 92, No.9 (2015) ref.094507, pp.1-11.

12. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion, PoS (LATTICE 2015) (2016), to be published.
13. A. Francis, O. Kaczmarek, M. Laine, T. Neuhaus and H. Ohno, Critical point and scale setting in SU(3) plasma: An update, Phys. Rev. D 91, no. 9, 096002 (2015).
14. H.-T. Ding, S. Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky and H.-P. Schadler, Diagonal and off-diagonal quark number susceptibilities at high temperatures, Phys. Rev. D 92, no. 7, 074043 (2015).
15. A. Francis, O. Kaczmarek, M. Laine, T. Neuhaus and H. Ohno, Nonperturbative estimate of the heavy quark momentum diffusion coefficient, Phys. Rev. D 92, no. 11, 116003 (2015).
16. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner, and M. Wagner, Curvature of the freeze-out line in heavy ion collisions, Phys. Rev. D 93, 014512 (2016).
17. H. Ohno, H.-T. Ding, S. Mukherjee, O. Kaczmarek and H.-T. Shu, Charmonia and bottomonia at finite temperature on large quenched lattice, Proceeding of Science (Lattice 2015) ref. 175.
18. A. Nakamura, S. Oka, Y. Taniguchi, QCD phase transition at real chemical potential with canonical approach, Journal of High Energy Physics, 2016(2), 1-19,
19. A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi, Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach, PoS LATTICE **2015** (2016) 165.
20. A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki and Y. Taniguchi, Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD PoS LATTICE **2015** (2016) 168.
21. R. Fuluda, A. Nakamura, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki and Y. Taniguchi, Beating the sign problem in finite density lattice QCD PoS LATTICE **2015** (2016) 208.
22. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa, Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD, Physical Review D92 (2015) no.1, 014501.

23. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Light Nuclei and Nucleon Form Factors in $N_f=2+1$ Lattice QCD, Proceedings of Science(LATTICE 2015) 081, arXiv:1511.09179.
24. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), $SU(3)$ gauge theory with four degenerate fundamental fermions on the lattice, arXiv:1512.00957.
25. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Walking and conformal dynamics in many-flavor QCD, arXiv:1601.02287.
26. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Lattice study of the scalar and baryon spectra in many-flavor QCD, arXiv:1510.07373.
27. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), S-parameter and vector decay constant in QCD with eight fundamental fermions, arXiv:1602.00796.
28. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Topological insights in many-flavor QCD on the lattice, arXiv:1510.05863.
29. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Topological observables in many-flavour QCD, arXiv:1601.04687.
30. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T.Yoshie, IR fixed points in $SU(3)$ gauge Theories, Phys. Lett. B748 (2015) 289-294.
31. J. Noaki, G. Cossu, K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, T. Yoshie, Study of the conformal region of the $SU(3)$ gauge theory with domain-wall fermions, arXiv:1511.06474 [hep-lat], in Proceedings of (Lattice 2015) in press.

32. K. -I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshie, Conformal Properties in High Temperature QCD, arXiv:1511.03411 [hep-lat].
33. T. Amagasa, S. Aoki, Y. Aoki, T. Aoyama, T. Doi, K. Fukumura, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, H. Jitsumoto, H. Kamano, Y. Konno, H. Matsufuru, Y. Mikami, K. Miura, M. Sato, S. Takeda, O. Tatebe, H. Togawa, A. Ukawa, N. Ukita, Y. Watanabe, T. Yamazaki, T. Yoshie, Sharing lattice QCD data over a widely distributed file system J. Phys.: Conf. Ser. 664 (2015) 4, 042058 (CHEP2015).
34. M. Yamada, K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano and H. Nemura, for HAL QCD Collaboration, $\Omega\Omega$ interaction from 2+1 flavor lattice QCD, PTEP 2015, no. 7, 071B01 (2015).
35. K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii and K. Murano, for HAL QCD Collaboration, Coupled-channel approach to strangeness $S = -2$ baryon-bayron interactions in lattice QCD, PTEP 2015, no. 11, 113B01 (2015).
36. S. Aoki, Hadron Interactions from lattice QCD EPJ Web Conf. 113 (2016) 01009, arXiv:1603.00989[hep-lat].
37. H. Matsufuru, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita, OpenCL vs OpenACC: Lessons from Development of Lattice QCD Simulation Code, Procedia Computer Science Volume 51 (2015) 1313.
38. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita, Lattice QCD code Bridge++ on arithmetic accelerators, Proceeding of Science (Lattice 2015) 040.
39. N. Ishibashi and T. Tada, Infinite circumference limit of conformal field theory, Journal of Physics A48 (2015) no.31, 315402.
40. N. Ishibashi and T. Tada, Dipolar quantization and the infinite circumference limit of two-dimensional conformal field theories, arXiv:1602.01190 [hep-th], UTHEP-681.
41. Zoltán Bajnok, János Balog, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Gábor Zsolt Tóth, Exact mass-coupling relation for the homogeneous sine-Gordon model, Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 181601, arXiv:1512.04673 [hep-th].
42. G. Ishiki, Matrix Geometry and Coherent States, Phys. Rev. D 92, no. 4, (2015) ref. 046009.
43. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, Kähler structure in the commutative limit of matrix geometry, arXiv:1603.09146 [hep-th], UTHEP-685.

44. N. Ishibashi and K. Murakami, Worldsheet theory of light-cone gauge non-critical strings on higher genus Riemann surfaces, arXiv:1603.08337 [hep-th], UTHEP-683.
45. Yuji Satoh and Yuji Sugawara, Non-geometric backgrounds based on topological interfaces, JHEP **1507** (2015) 022.
46. Yuji Satoh, Yuji Sugawara and Taiki Wada, Non-supersymmetric asymmetric orbifolds with vanishing cosmological constant, JHEP **1602** (2016) 184.
47. M. Hanada, Y. Hyakutake, G. Ishiki and J. Nishimura, Numerical tests of the gauge/gravity duality conjecture for D0-branes at finite temperature and finite N , arXiv:1603.00538 [hep-th], UTHEP-682.
48. T. Asakawa, H. Muraki, S. Watamura Gravity theory on Poisson manifold with R -flux, Fortschritte der Physik 63 (2015) 683-704.
49. Tetsuji Kimura, Gauge-fixing Condition on Prepotential of Chiral Multiplet for Nongeometric Backgrounds, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) no.2, 023B04.

〈著書・総説等〉

1. 花田 正範, 百武 慶文, 伊敷 吾郎, 西村 淳, 「量子ブラックホールのホログラム的記述の数値的検証」, Sience 「サイエンス誌に載った日本人研究者」 (2015), p46.
2. 伊敷 吾郎, 西村 淳, 花田 正範, 百武 慶文, 「ブラックホールに対するホログラフィック原理の数値的検証」, 日本物理学会誌 70 巻, 6 号 (2015), p436 .

〈学位論文〉

[修士論文]

1. 賀数 淳平
「 $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD による微小な運動量移行での π 中間子形状因子計算へ向けた基礎研究」
2. 三崎 博道
「高階微分項を含む重力理論における因果律の破れ」
3. 深山 陽平
「メンブレンの幾何と行列模型」

〈非常勤講師・集中講義〉

1. 伊敷吾郎, 「超弦理論と行列正則化」, Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories, 筑波大学計算機センター, 2015 年 8 月 26 日-28 日.
2. 木村哲士「微分積分 II」、東京工科大学コンピュータサイエンス学部、2015 年 4 月-9 月.
3. 木村哲士「素粒子や時空とは?」(夏期特別講座)、千代田区立九段中等教育学校、2015 年 8 月 20 日.

〈研究成果発表（講演）〉

[国際会議]

1. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya 「Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion」, The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 7.14-18, 2015).
2. E. Itou, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda 「(2+1)-flavor QCD Thermodynamics from the Gradient Flow」, The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 7.14-18, 2015).
3. Y. Taniguchi 「QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient flow」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (BNL, NY, USA, 3.9-11, 2016).
4. Yoshinobu Kuramashi, 「Tensor Network Scheme for Lattice Gauge Theories」(招待講演), XXVII IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2015), (Indian Institute of Technology Guwahati,, Assam, India, December 2-5, 2015).
5. Hiroshi Ohno, 「Charmonia and bottomonia at finite temperature on large quenched lattice」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015) (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, Jul. 14-18, 2015).
6. Hiroshi Ohno, 「Charmonium and bottomonium spectral functions from lattice QCD at finite temperature」, The XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015) (Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan, Sept. 27-Oct. 3, 2015).
7. Hiroshi Ohno, 「Charmonia and bottomonia in hot medium and heavy quark diffusion from lattice QCD at finite temperature」(招待講演), New Progress

- in Heavy Ion Collision: What is Hot in the QGP (CCNU, Wuhan, China, Oct. 5-9, 2015).
8. Hiroshi Ohno, 「Charmonium and bottomonium spectral functions at finite temperature」 (招待講演), RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (BNL, New York, USA, Mar. 9-11, 2016).
 9. 鈴木遊 「Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015), (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
 10. 鈴木遊 「Study of finite density phase transition with Canonical approach」, The 13th international eXtreme QCD conference (XQCD 2015), (CCNU, Wuhan, China, Sep. 21-23, 2015).
 11. 鈴木遊 「Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD」, The XXV international conference on ultra-relativistic heavy-ion collisions (Quark Matter 2015), (Kobe Fashion Mart, Kobe, Japan, Sep. 27- Oct. 3, 2015).
 12. 鈴木遊 「Calculation of Hadronic observable with Canonical approach in finite density lattice QCD」, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016, (BNL, NewYork, USA, March 9-11, 2016).
 13. 谷口裕介 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2015), (Kobe Convention Center, Kobe, Japan, 14 July 2015 - 18 July 2015).
 14. 谷口裕介 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」, XXV INTERNATIONAL CONFERENCE ON ULTRA-RELATIVISTIC NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS (Quark Matter 2015), (Kobe, Fashion Mart, Japan, September 27 - October 3, 2015).
 15. 谷口裕介 「Study of high density lattice QCD with canonical approach」, Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)’, (Nara Kasugano International Forum IRAKA, Nara, Japan, November 4-8, 2015).
 16. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei from 2+1 flavor lattice QCD」 (招待講演), Lattice Nuclei Nuclear physics and QCD – Bridging the gap – (European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ECT*), Italy, June 6-10, 2015).
 17. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD」, The 33rd International Symposium on lattice field theory (Lattice 2015) (Kobe International Conference Center, Japan, June 14-18, 2015).

18. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD」 (招待講演), The 5th International Workshop on Lattice Hadron Physics (LHPV) (Conference Centre of the Cairns Colonial Club Resort, Australia, June 20-24, 2015).
19. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD」 (招待講演), Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on "Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics" (CANHP2015) (Yukawa Institute of Theoretical Physics (YITP), Kyoto University, Japan, September 21-October 30, 2015).
20. Takeshi Yamazaki 「Light nuclei and nucleon form factors from lattice QCD」, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015) (Nara Kasugano International Forum IRAKA, Japan, November 4-8, 2015).
21. Takeshi Yamazaki 「Nucleon form factors and light nuclei in $N_f=2+1$ lattice QCD」 (招待講演), RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 (Brookhaven National Laboratory, USA, March 9-11, 2016).
22. 吉江 友照 「Sharing lattice QCD data over a widely distributed file system」 21st International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP2015) (Okinawa, Japan, April 13 - 17, 2015).
23. 吉江 友照 「Metadata Working Group Report」 23th Workshop of International Lattice Data Grid (video conference hosted by CSSM, Adelaide, Australia, April 24, 2015).
24. S. Aoki, 「Hadron Interactions from lattice QCD」 (招待講演), 21th International Conference on Few-Body Problems in Physics, (Chicago, USA, May 18-22, 2015).
25. S. Aoki, 「Nuclear forces from lattice QCD」 (招待講演), ECT* Workshop on "Lattice Nuclei Nuclear Physics and QCD - Bridging the gap", (Trento, Italy, July 6-10, 2015).
26. S. Aoki, 「Comparative studies for baryon interactions with HAL QCD method and Luscher's method」 (招待講演), Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop on "Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics", (YITP, Kyoto, Japan, September 21-October 30, 2015).
27. S. Aoki, 「Recent developments and challenges in lattice QCD」 (招待講演), International Symposium "RIKKYO MathPhys 2016", (Rikkyo University, Tokyo, Japan, January 9-11, 2016).
28. S. Aoki, 「New strategies with HAL QCD potential method」 (招待講演), Joint HAL QCD-CalLat mini-workshop on lattice QCD for NP, (LBL, Berkeley, USA, January 27-29, 2016).

29. S. Aoki, 「Hadron interactions at heavier quark masses in lattice QCD –Are deuteron and di-neutron bound ? –」 (招待講演) , YITP and IOPP Joint workshop on Heavy Ion Physics, (CCNU, Wuhan, China, February 20, 2016).
30. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「An implementation of hybrid parallel CUDA code for the hyperonic nuclear forces」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory, (Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
31. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「A fast algorithm for lattice hyperonic potentials」, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, (Tohoku University, Sendai, Japan, September 7 - 12, 2015).
32. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「Hyperonic lattice QCD potentials and hypernuclear few-body problems」, YIPQS Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015), (YITP, Kyoto, Japan, September 21 - October 30, 2015).
33. H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration), 「Algorithm, benchmarks, and hyperon potentials with strangeness $S = -1$ at almost physical point」, Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)’, (Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan, November 4 - 8, 2015).
34. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「First results on baryon interactions from lattice QCD with physical masses (3) –Strangeness $S=-2$ two-baryon system–」, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory(LATTICE2015) (Kobe, Japan, Jul. 14-18, 2015).
35. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Results from HALQCD on light nuclei and exotic states」, EMMI workshop on anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC (CERN, Geneva, Switzerland, Jul. 20-22, 2015).
36. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Coupled channel baryon-baryon interactions on the lattice」, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), (Tohoku University, Sendai, Japan, Sept. 7-12, 2015).
37. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Lattice QCD studies of baryon-bayon interactions and dibaryon states」, ELPH workshop C013 ”Meson Production and Meson-Baryon Interaction”, (Tohoku University, Sendai, Japan, Sept. 12-14, 2015).
38. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Physical point lattice QCD simulation on the $S = -2$ baryon-baryon interactions」, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015), (Nara, Japan, Nov. 4-8, 2015).

39. Y.Namekawa 「Comparative study of topological charge in lattice QCD」 ,
Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015) (Nara, Japan, Nov
4-8, 2015).
40. Nobuyuki Ishibashi, 「 “ Dimensional regularization of light-cone gauge super-
string field theory and multiloop amplitudes」 (招待講演)
International Conference on String Field Theory and Related Aspects VII,
SFT2015 (ChengDu, China, May 11-15, 2015).
41. Yuji Satoh 「Analytic expansions of strong-coupling amplitudes in N=4 SYM」
(招待講演),
Amplitudes in Asia 2015 (National Center for Theoretical Sciences, Taipei,
Taiwan, November 2 - 6 , 2015).
42. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Coherent States」 (招待講演) ,
Workshop on Noncommutative Field Theory and Gravity (Corfu, Greece, Sep.
21-26, 2015).
43. Goro Ishiki, 「Spherical M5-branes from the plane wave matrix model」 ,
KEK theory workshop Dec. (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 1-4, 2015).
44. Goro Ishiki, 「Spherical M5-branes from the plane wave matrix model」 ,
YITP workshop 「Developments in String Theory and Quantum Field Theory」
(YITP, Kyoto, Japan, Nov. 9-13, 2015).
45. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Coherent States」 ,
YITP workshop 「Numerical approaches to the holographic principle, quantum
gravity and cosmology」 (YITP, Kyoto, Japan, July 21-24, 2015).
46. Goro Ishiki, 「Matrix Geometry and Coherent States」 ,
The 33nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015)
(Kobe, Japan, July 14-18, 2015).
47. Takaki Matsumoto, 「New construction method of Matrix Regularization
using coherent states」 ,
Geometry in Gauge Theories and String Theory (Korea Institute for Advanced
Study, Seoul, Korea, Sep. 15-18, 2015).
48. Takaki Matsumoto, 「New construction method of Matrix Regularization using
coherent states」 ,
YITP workshop 「Developments in String Theory and Quantum Field Theory」
(YITP, Kyoto, Japan, Nov. 9-13, 2015).
49. Takaki Matsumoto, 「Kähler Structure in Matrix Geometry」 ,
KEK workshop 2015 Dec. (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 1-4, 2015).

50. Hisayoshi Muraki, 「Gravity on Poisson manifold」
Workshop on Higher structures in string theory and M-theory (Tohoku university, Sendai, Mar. 7-11, 2016).
51. Hisayoshi Muraki, 「Gravity theory on Poisson manifold with R-flux」
KEK workshop 2015 Dec. (KEK, Tsukuba, Dec. 1-4, 2015).
52. Hisayoshi Muraki, 「Gravity theory on Poisson manifold with R-flux」
YITP workshop 「Developments in String Theory and Quantum Field Theory」
(Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto, Nov. 9-13, 2015).
53. Tetsuji Kimura, 「Exotic five-branes」, 2nd String Theory in Greater Tokyo
(RIKEN, Saitama, Japan, June 9, 2015).

[国内学会、研究会]

1. 伊藤悦子, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士 「グラディエント フローを用いた $N_f=2+1$ QCD の熱力学量の測定」,
日本物理学会 (大阪市大, 大阪, 9.25-28, 2015).
2. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝
「Gradient flow で見る有限温度 QCD」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016).
3. 白銀瑞樹, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 石見涼 「Quenched QCD の一次相
転移点における潜熱と圧力ギャップ」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016).
4. 石見涼, 江尻信司, 金谷和至, 大野浩史, 梅田貴士, 吉田信介 「O(4) スケーリング
を用いた有限温度・密度 QCD の相転移線」,
日本物理学会 第 71 回年次大会 (東北学院大, 仙台, 3.19-22, 2016).
5. 大野浩史 「Quarkonia at finite temperature」 (招待講演), 研究会「有限温度密度
系の物理と格子 QCD シミュレーション」 (筑波大学計算科学研究センター,
つくば, 2015 年 9 月 5 日).
6. 大野浩史 「有限温度格子 QCD によるチャーモニウム及びボトモニウムスペク
トル関数の研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学杉本キャンパ
ス, 大阪, 2015 年 9 月 25 日-28 日).
7. 谷口裕介 「QCD phase transition at real chemical potential with canonical
approach」, JICFUS セミナー, (京都大学).
8. 谷口裕介 「カノニカル法で発見した格子 QCD の有限密度相転移現象の研究」,
日本物理学会 2015 年秋季大会, (2015 年 9 月 25 日?2015 年 9 月 28 日 大阪市立
大学 (杉本キャンパス)).

9. 鈴木 遊「カノニカル法を用いた有限密度格子 QCD における相転移現象の研究」, 日本物理学会秋季大会, (大阪市立大学, 2015 年 9 月 25 日-28 日).
10. 鈴木 遊「カノニカル法を用いた有限密度格子 QCD における相転移現象の研究」, 原子核三者若手夏の学校, (ホテルたつき, 愛知, 2015 年 8 月 17 日-22 日).
11. 鈴木 遊「カノニカル法を用いた有限密度格子 QCD における物理量の計算とその体積依存性の研究」, 第 71 回年次大会, (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日-22 日).
12. 山崎 剛, 石川 健一, 蔵増 嘉伸, 佐々木 勝一, 宇川 彰 for PACS Collaboration, 「改良されたウィルソンフェルミオン作用を用いた $2+1$ フレーバー QCD による核子形状因子の研究」 日本物理学会 2015 年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015 年 9 月 25-28 日).
13. 山崎 剛, 蔵増 嘉伸, 石川 健一, 浮田 尚哉, 「格子 QCD を用いた原子核構造計算へ向けた基礎研究」, HPCI 第 2 回成果報告会 (日本科学未来館, 東京, 2015 年 10 月 26 日).
14. 山崎 剛, 石川 健一, 蔵増 嘉伸, 宇川 彰 for PACS Collaboration 「 $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD による軽原子核束縛エネルギーの計算」, 日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 宮城, 2016 年 3 月 19-22 日).
15. 賀数 淳平 「 $N_f = 2 + 1$ 格子 QCD による微小な運動量移行での π 中間子形状因子の研究」 日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016 年 3 月 19 日-22 日) .
16. 吉江 友照 「計算物理学におけるデータシェアリングの現状と課題」(招待講演) データシェアリングを利用した科学技術に関する勉強会 (文科省, 東京, 2015 年 5 月 13 日).
17. 吉江 友照 「格子シミュレーションによるコンフォーマル理論の研究」 筑波大学計算科学研究センター学際共同利用成果報告会 (筑波大学, つくば, 2015 年 10 月 20 日)
18. 吉江 友照 「計算素粒子物理データ管理・共有基盤 JLDG」 HPCI システム利用研究課題成果報告会 (科学未来館, 東京, 2015 年 10 月 26 日).
19. 吉江 友照 「HEPnet-J/sc 報告」 2015 年度 HEPnet-J ユーザー会、(広島大学, 広島, 2015 年 11 月 24-25 日) .
20. 根村英克, (HAL QCD Collaboration) 「ハイパー核の少数多体系計算に向けた格子 QCD によるハイペロンポテンシャルの研究」, 日本物理学会 2015 年秋季大会, (大阪市立大学 (杉本キャンパス), 2015 年 9 月 25-28 日).

21. 根村英克, (HAL QCD Collaboration) 「格子 QCD によるハイペロンポテンシャルと軽い原子核への応用」, 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」の第4回研究会, (湘南国際村センター、2015年9月17-18日).
22. 根村英克, (for HAL QCD Collaboration), 「ハイパー核の少数多体系計算に向けた HAL QCD 法によるハイペロンポテンシャルの研究」, 日本物理学会 第71回年次大会, (東北学院大学泉キャンパス、2016年3月19-22日).
23. K. Sasaki for HAL QCD Coll., 「Coupled channel approach to two-baryon interactions from QCD」, ストレンジネス・ハドロン合同研究会, (KEK 東海キャンパス、2015年8月3-7日).
24. 佐々木健志 for HAL QCD Coll. 「物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 $-S=-2$ セクター」, 日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大、2015年9月25-28日).
25. 佐々木健志 for HAL QCD Coll., 「物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 $[2] - S=-2$ セクター」, 日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学泉キャンパス、2016年3月19-22日).
26. K.Sasaki for HAL QCD Coll., 「Dibaryon searches from lattice QCD」, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム (ワンテラスコモンホール、東京都千代田区神田、2016年3月30-31日).
27. 石橋 延幸、 「Dimensional regularization of light-cone gauge superstring field theory and multiloop amplitudes」, 日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015年9月25日-28日).
28. Yuji Satoh 「World-sheet conformal interfaces and their applications」 (招待講演), 弦の場の理論 16 (筑波大学東京キャンパス, 東京, 2016年2月22-23日).
29. 伊藤克司, 佐藤勇二, Chris Locke, 束紅非, 「T-Q relation for modified affine B2 Toda field equation」, 日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016年3月19-22日).
30. Zoltan Bajnok, Janos Balog, 伊藤克司, 佐藤勇二, Gabor Zsolt Toth, 「Exact mass-coupling relation of simplest multi-scale quantum integrable model」, 日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016年3月19-22日).
31. 佐藤勇二, 菅原祐二, 和田大樹, 「Non-susy asymmetric orbifolds with vanishing cosmological constant」, 日本物理学会第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台 2016年3月19-22日).

32. 伊敷 吾郎, 「Numerical simulation for superstring theory」(招待講演),
～スパコン「京」がひらく科学と社会～第2回「京」を中核とするHPCIシス
テム利用研究課題 成果報告会, (日本科学未来館, 東京, 2015年10月26日).
33. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 深山 陽平, 島田 英彦, 「コヒーレント状態による行列正
則化の新しい構成法」,
日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大学, 大阪, 2015年9月25日-28日).
34. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 村木 久祥, 「Kähler Structure in Matrix Geometry」,
日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016年3月19日-22日).
35. 伊敷 吾郎, 松本 高興, 村木 久祥, 「ゆらいだ非可換球面上のケーラー構造につ
いて」,
日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016年3月19日-22日).
36. 浅野 侑磨, 伊敷 吾郎, 島崎 信二, 寺嶋 靖治, 「Spherical fivebranes from the
plane wave matrix model」,
日本物理学会 第71回年次大会 (東北学院大学, 仙台, 2016年3月19日-22日).
37. 伊敷 吾郎, 「Numerical simulation for superstring theory」(ポスター発表),
～スパコン「京」がひらく科学と社会～第2回「京」を中核とするHPCIシス
テム利用研究課題 成果報告会, (日本科学未来館, 東京, 2015年10月26日).
38. 浅川 嗣彦, 村木 久祥, 綿村 哲, 「A study of construction of gravity theory
based on generalized geometry」,
日本物理学会 2015年秋季大会 日本物理学会 2015年秋季大会 (大阪市立大
学, 大阪, 2015年9月25日-28日).
39. 村木 久祥 「A study of construction of gravity theory based on generalized
geometry」
「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 (岡山衛生会館、岡山、
2015年9月14-18日) .

〈受賞〉

1. H P C I 優秀成果賞受賞, 課題番号 hp140067 (代表: 花田正範, 伊敷吾郎), 2015
年10月26日.

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 第33回格子上の場の理論国際会議組織委員会主催 (組織委員長: 藏増嘉伸),
The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015),
2015年7月14-18日, 神戸国際会議場, 神戸.

2. 筑波大学計算科学研究センター/理研BNL研究センター共催,
RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016,
2016年3月9-11日, BNL, NY.
3. 筑波大学計算科学研究センター/計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 主催, 研究会「有限温度密度系の物理と格子QCDシミュレーション」2015年9月5日,
筑波大学計算科学研究センター, つくば.
4. 筑波大学計算科学研究センター/理研BNL研究センター 共催, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016 2016年3月9日-11日, Brookhaven National Laboratory, New York, USA.
5. 主催: 筑波大学計算科学研究センター, 計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 有限温度密度QCDの数値的研究における最近の発展 2015年9月5日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
世話人: 青木保道 (名古屋大), 浮田尚哉 (筑波大), 梅田貴士 (広島大), 江尻信司 (新潟大), 大野浩史 (筑波大), 金児隆志 (KEK), 武田真滋 (金沢大), 滑川裕介 (筑波大), 山崎剛 (筑波大)
6. Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories 2015年8月26-28日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
世話人: 齋藤華 (連絡責任者), 石塚成人, 大野浩史, 金谷和至, 藏増嘉伸, 谷口裕介, 山崎剛, 吉江友照
7. YIPQS Long-term and Nishinomiya-Yukawa Memorial International Workshop, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics (CANHP 2015), 2015年9月21日-10月30日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都.
8. 筑波大学計算科学研究センター, 計算基礎科学連携拠点共催研究会「有限温度密度系の物理と格子QCDシミュレーション」2015年9月5日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
9. 「弦の場の理論16」、2016年2月22日-23日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京.
世話人: 岸本功 (新潟大), 伊敷吾郎, 佐藤勇二, 石橋延幸
10. 基研研究会「Numerical approaches to the holographic principle, quantum gravity and cosmology」, 2015年7月21日-24日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都.

〈国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動〉

1. 計算基礎科学連携拠点
<http://www.jicfus.jp/jp/>

2. High Performance Computing Infrastructure (HPCI) 戦略プログラム
<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>
3. 理化学研究所計算科学研究機構 (AICS)
<http://www.aics.riken.jp/>
4. International Lattice Data Grid (ILDG)
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
5. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
6. 石橋延幸, 日本学術振興会学術システム研究センター専門委員
7. 石橋延幸, PTEP 編集委員
8. 佐藤勇二, 欧州の学際研究教育ネットワーク「Gauge Theory as an Integrable System (GATIS)」(<http://gatis.desy.eu/>) のグローバルネットワークへの参加
9. 佐藤勇二, Hungarian Academy of Sciences (HAS)との二国間交流事業（共同研究）「ゲージ理論/重力理論双対性における可積分性と強結合ゲージ理論ダイナミクス」代表